การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

Impact Strength of Meta kaolin and Fly Ash Concrete

จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสาน ประกอบด้วย เถ้าลอย และดินขาว โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัด และแรงกระแทกของคอนกรีตโดยผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.40และ 0.45 และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนของเถ้าลอย ที่ร้อยละ 15, 30และ35 สำหรับดินขาวร้อยละ10,15 และ20 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 x 20 เซนติเมตร แบบคานสองขนาด 10x10x40 และ 4 x 4 x 16 เซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตตัวอย่างที่อายุ 28 วัน และ w/b เท่ากับ 0.40 ให้ค่ามากกว่าที่ 0.45 ทุกส่วนผสม การพิจารณากำลังรับแรงอัด โดยแทนที่ปูนซิเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นจนถึง ร้อยละ30 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 382 กก.ต่อ ตร.ซม. สูงกว่าแทนที่ด้วยดินขาวร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ 354 กก.ต่อ ตร.ซม. สำหรับกำลังรับแรงดัด เมื่อพิจารณาตัวอย่างควบคุม จะให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 32.48 กก.ต่อ ตร.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับแทนที่ปูนซิเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 มีค่าเท่ากับ 31 กก.ต่อ ตร.ซม. ร้อยละ30 มีค่าเท่ากับ 30 กก.ต่อ ตร.ซม. และ ร้อยละ45 มีค่าเท่ากับ 23.85 กก.ต่อ ตร.ซม. ในขณะที่การแทนที่ด้วยดินขาวที่ร้อยละ10 มีค่าเท่ากับ 40.10 กก.ต่อ ตร.ซม. ให้ค่าสูงกว่าที่ร้อยละ 15, 20 และตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ สำหรับการพิจารณากำลังรับแรงกระแทกโดยแทนที่ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 111 จูล ให้ค่าสูงสุดมากว่าแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ30 มีค่าเท่ากับ110 จูล ดินขาวร้อยละ 15 เถ้าลอยร้อยละ 15 และ 45 ตามลำดับ

Abstract

This research to study the possibility of material pozzolan as binder by replacment cement by fly ash (FA) and meta kaolin (MK) , some for testing compressive strength, flexural strength and impact strength of concrete vary the ratio of water to binder (w / b) of 0.40 and 0.45 and the amount of fly ash to replace cement, some 15 %, 30 % MK and 35% for 10%, 15% and 20% by weight of cement. The sample consisted of a cylinder diameter of 10 x 20 cm beam sizes 10 x 10 x 40 cm and 4 x 4 x 16 cm from the test results showed that the concrete samples at 28 days and w/b of 0.40 to greater than 0.45 all mixed. the compressive strength by replacing cement with FA increase up to 30 % compression of 382 ksc higher than the 20 percent replace by MK were equal to 354 ksc and 32.48 ksc compared to replace cement with FA, 15 % is equal to 31 ksc, 30% were equal to 30 ksc and 45% were equal to 23.85 ksc, while the MK was replaced by 10% were equal to 40.10 ksc higher than to 15% , and 20% respectively. The control sample was replaced with MK by 10% is equal to 111 joules maximum replaced by fly ash more than 30% were equal to 110 joules and MK were 15%, fly ash, 15 and 45 percent respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะในด้านแรงกระแทกของคอนกรีตและผู้ร่วมวิจัยที่ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้น สำหรับแนวความคิดในการทำงานวิจัยให้ผู้วิจัยมีแนวทางในการทำวิจัย ทั้งยังทำงานวิจัยต้นแบบและแบบอย่างในงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และผู้ช่วยนักวิจัยอาจารย์ในสาขาวิชาสาขาวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยให้คำแนะนำและตรวจทานผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดียิ่งขึ้นรวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่องานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านของเครื่องมือ สถานที่ การทำหนังสือขออนุญาตในด้านต่างๆและคำแนะนำในการทำการทดสอบทำให้สามารถทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่นรวมถึงขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอมอบคุณงามความดีทั้งหมดให้แก่มารดาและญาติของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีวันที่ผู้วิจัยได้มีวันนี้ รวมถึงให้กำลังใจกับผู้วิจัยในทุกๆด้านตลอดมาตั้งแต่ผู้วิจัยได้เกิดมาบนโลกใบนี้และให้ทัศนคติในการดำรงชีวิตให้สามารถดำรงชีวิตมาจนวันนี้ได้สิทธิประสาทวิชาความรู้และผู้ให้ความช่วยเหลืออนุเคราะห์แก่คณะผู้จัดทำทุกท่าน

จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปูนซีเมนต์	3
2.2 วัสดุปอซโซลาน	3
2.3 เถ้าลอย	4
2.4 ดินขาวเผา	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 แผนการดำเนินการ	18
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	18
3.3 วิธีการที่ใช้ในการศึกษา	19
3.4 ผลการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย, ดินขาว	24
4.2 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย, ดินขาว	28
4.3 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย, ดินขาว	33
4.4 วิจารณ์	35
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ	43
ภาคผนวก ข ภาพแสดงการทดลอง	55

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติ	3
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณองค์ประกอบเป็นเปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก (ระหว่างปี พ.ศ. 2533 - 2542)	4
2.3	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a	5
2.4	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาวเผา	11
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผา	11
2.6	องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของดินขาวเผาเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 168	12
2.7	ค่าความละเอียดของดินขาวที่บดในช่วงเวลาต่างๆ	16
2.8	ค่ากำลังอัดและค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ผ่านการบดในช่วงเวลาต่างๆ	17
3.1	ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต (slump = 3-5 cm) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	20
3.2	ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต (slump = 3-5 cm) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45	21
4.1	กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยต่างๆ	25
4.2	กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาวต่างๆ	25
4.3	กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอายุ 14 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยต่างๆ	29
4.4	กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 14 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาวต่างๆ	29
4.5	กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยต่างๆ	30
4.6	กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาวต่างๆ	30
4.7	กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยและผสมดินขาวต่างๆ	34
ก.1	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	44
ก.2	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	44
ก.3	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	44
ก.4	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 45

ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 45

ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 46

ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 46

ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 46

ก.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 47

ก.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 47

ก.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 47

ก.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 48

ก.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 48

ก.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 48

ก.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 49

ก.17 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 49

ก.18 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 49

ก.19 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 50

ก.20 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 50

ก.21 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.22 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 51

ก.23 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 51

ก.24 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 51

ก.25 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 52

ก.26 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 52

ก.27 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 52

ก.28 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 53

ก.29 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 53

ก.30 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 10 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 53

ก.31 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 54

ก.32 ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 54

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	ลักษณะเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตควบคุม	20
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	26
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	26
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45	27
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45	27
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตกับอายุของเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	31
4.6	แสความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตกับอายุของดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40	31
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตกับอายุของเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45	32
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดของคอนกรีตกับอายุของดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45	32
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงกระแทกของคอนกรีตกับอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45	34
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงกระแทกของคอนกรีตกับอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45	35
ข.1	วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	56
ข.2	แบบหล่อคอนกรีต	56
ข.3	การผสม การตรวจสอบการไหลของมอตาร์ การยุบตัวและการบ่มคอนกรีต	57
ข.4	การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต	59

บทที่ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าผ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าประมาณวันละ 40,000 ตัน ผลพลอยได้จากการควบคุมคุณภาพถ่านหินลิกไนต์ที่ส่งเข้าไปเผาไหม้นี้ทำให้ได้เถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยที่มีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอประมาณวันละ 6,000 ตัน

เถ้าลอยโดยทั่วไปมีคุณลักษณะที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้นได้ เช่น ช่วยให้ทำงานกับคอนกรีตสดได้ง่ายขึ้น (หมายถึง เทเข้าแบบง่าย ไหลสะดวก ลดการเยิ้มของน้ำ และลดการแยกตัวของกรวดหรือหินย่อยได้ดี), ในขณะที่คอนกรีตก่อตัวจะช่วยลดการสะสมความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในมวลคอนกรีตลงได้ และในระยะยาวจะช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปทรง, เพิ่มกำลังรับอัด และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตในดินหรือจากน้ำทะเล เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำเถ้าลอยไปใช้ในหลายๆ ด้าน เช่น การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตกำลังสูง (High strength concrete), การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตให้ความร้อนต่ำ (Low heat concrete), การก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด (Roller compacted concrete, RCC), งานก่อสร้างถนนคอนกรีตบดอัด (Roller compacted concrete pavement, RCCP), และงานคอนกรีตคุณภาพสูงซึ่งสามารถไหลเข้าแบบได้เองโดยไม่ต้องอาศัยการสั่นสะเทือนเข้าช่วย (Self-compacting concrete, SCC)

จากคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมดังที่กล่าวมานี้ประกอบกับการผลิตปูนซีเมนต์นั้นใช้พลังงานจำนวนมาก และในปัจจุบันมีเถ้าลอยที่ต้องเป็นภาระในการจัดเก็บเกิดขึ้นอย่างมากมายในแต่ละวัน ซึ่งรวมเป็นจำนวนไม่น้อยกว่า 2 ล้านตันในแต่ละปีจึงควรที่จะมีการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพื่อที่จะเป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ลดต้นทุนวัสดุในการผลิตคอนกรีต และเพิ่มคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต

ดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเผา และบดที่อุณหภูมิสูง และช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่ละเอียด สามารถผสมแทนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเมื่อผสมน้ำ แต่ว่าการศึกษา และวิจัยภายในประเทศเกี่ยวกับการนำดินขาวเผามาใช้ในงานคอนกรีตยังมีจำกัด เมื่อเทียบกับการศึกษาและวิจัยเถ้าลอยนำมาผสมในคอนกรีตทำกันอย่างแพร่หลายในประเทศ แต่จากรายงานการศึกษาการใช้ดินขาวเผา (Sayamipuk, 2000 และ อนุพงศ์ 2543) พบว่าดินขาวเผามีผลกระทบต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ที่ดีขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้น ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่การใช้ดินขาวเผาในงานคอนกรีตยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ดินขาวเผามีการดูดซึมน้ำสูง ทำให้มีผลต่อการลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ค่าการยุบตัวจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น (จิรวัฒน์, 2546) ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น อุณหภูมิ และความร้อนในคอนกรีตเพิ่มขึ้นนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวได้ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากดินขาวมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีความไวต่อการทำปฏิกิริยา (Moises and Cabrera, 2000) ดินขาวที่ผ่านการขบวนการเผาด้วยอุณหภูมิที่พอเหมาะคือ 800 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 6 ชั่วโมง จะทำให้ดินขาวมีปฏิกิริยาทางเคมีมากที่สุด (Sayamipuk, 2000)

ในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวธรรมชาติหลายแหล่ง เช่น ดินขาวจากลำปาง ปราจีนบุรี ระนอง เป็นต้น แต่การใช้งานส่วนใหญ่มักจะอยู่ในอุตสาหกรรมเซรามิค ข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับวานนำดินขาวมาใช้ในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อยซึ่งแตกต่างจากกรณีเถ้าลอยและซิลิก้าฟูมที่ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายและนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตในก่อสร้างทั่วไป ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงผลกระทบของการผสมดินขาวเผาที่มีผลต่อคุณสมบัติเพสต์และมอร์ต้าร์ โดยเน้นการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ซึ่งมีการศึกษาน้อยมากในประเทศไทย เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมผลกระทบของดินขาวเผาต่อเพสต์และมอร์ต้าร์มากขึ้น และเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองเกี่ยวกับกำลังอัด กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และดินขาว เพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำเถ้าลอยและดินขาวมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีต และประหยัดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ให้ลดลง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 หาความสัมพันธ์ของปริมาณเถ้าลอยและดินขาวที่ผสมกับกำลังอัด, กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

1.2.2 หาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัด, กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว

1.2.3 หาผลของค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีต่อความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมของเถ้าลอยและดินขาวกับกำลังอัด, กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัด, กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต

1.3.2 ออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยและดินขาว 3 แบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.32 ตามวิธีที่เสนอใน ACI 211.1-91 “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete”

1.3.2 แล้วแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนผสมทั้ง 2 แบบด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0, 15, 30 และ 45% โดยน้ำหนัก และแทนด้วยดินขาวในอัตราส่วน 0, 15, 30 และ 45% โดยน้ำหนัก

1.3.3 ควบคุม ให้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอยและดินขาวและควบคุมค่า Slump ให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม.

1.3.4 การบ่มจะทำการบ่มขึ้นต่อเนื่องในห้องทดลอง 14 และ 28 วันแล้วจึงนำมาทดสอบกำลังอัด และกำลังดัด และส่วนขอการรับแรงกระแทก จะทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยทุกสัดส่วนผสมของแต่ละการทดลองจะทำการหล่อชิ้นตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตรับแรงกระแทกผสมเถ้าลอยและดินขาว

1.4.2 เป็นทางเลือกใหม่ในการนำเถ้าลอยและดินขาวมาใช้เพื่อลดต้นทุนแทนการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็ว (High-early strength) หรือปูนซีเมนต์ประเภทสาม เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงในระยะแรกเร็วกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา มีเนื้อละเอียดกว่า ผลิตโดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม (เพิ่ม C_3S และลด C_2S) หรือโดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบเร็ว เช่น งานเสาเข็มคอนกรีต งานชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น

สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไตรคัลเซียมซิลิเกต (Tricalcium sillicate), ไดคัลเซียมซิลิเกต (Dicalcium sillicate), ไตรคัลเวียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และเทตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite) ดังตารางที่ 1 โดยทั่วไปแล้วปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งจะมี C_3S 49% และ C_2S 25% ส่วนปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะมี C_3S 56% และ C_2S 15% จึงทำให้มีกำลังอัดสูงในระยะแรก

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติ

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	คุณสมบัติ
ไตรคัลเซียมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S	ทำให้เกิดกำลังอัดเร็วในระยะแรก มีอัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลาง
ไดคัลเซียมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S	ทำให้เกิดกำลังอัดในระยะหลัง ทำปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้า
ไตรคัลเวียมอลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	ทำให้เกิดกำลังอัดได้เร็วมากในระยะแรก เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที แต่ไม่ช่วยให้มีกำลังอัดในระยะหลัง
เทตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังอัดทั้งในระยะแรก และระยะหลัง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ

2.2 วัสดุปอซโซลาน

ASTM C 618-94a “ Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan of use as a mineral admixture in Portland cement concrete” ให้คำจำกัดความของสารปอซโซลานไว้ว่า “สารปอซโซลาน เป็นวันสดุที่มีซิลิกาหรืออลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious properties) แต่ถ้ามีความละเอียดมาก และมีน้ำที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์ในวงการก่อสร้างในปัจจุบันและเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 ชนิดคือ ซิลิก้าฟูม (Silica fume) และเถ้าถ่านหิน (Fly ash) หรือเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือจากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

2.2.1 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยจะแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่ใช้, ความละเอียดของถ่านหินที่บดก่อนเข้าเตาเผา อุณหภูมิละความร้อนจากการเผา และระบบในการดักจับและเก็บเถ้าลอย ดังนั้นคุณภาพของเถ้าลอยจึงผันแปรไปตามโรงไฟฟ้าแต่ละโรง

2.2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), คัลเซียมออกไซต์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอย และขบวนการผลิต เมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอบของต่างประเทศความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจน คือปริมาณคัลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจะอยู่ระหว่าง 9-17% ในขณะที่เถ้าลอยส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะมี Cao อยู่ระหว่าง 2-7% เท่านั้น องค์ประกอบโดยเฉลี่ยทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะในรอบ 10 ปีล่าสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณองค์ประกอบเป็นเปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก (ระหว่างปี พ.ศ. 2533 - 2542)

Chemical composition	Average Value in Percentages Year (พ.ศ.)										ASTM C618-94a REQUIREMENT FOR FLY ASH CLASS C
	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	
SiO_2	37.8	42.8	40.3	43.1	52.8	40.6	40.6	41.5	37.3	47.2	Min. SUM = 50
Al_2O_3	20.5	23.3	24.0	20.2	18.0	22.8	23.6	28.1	22.3	22.1	
Fe_2O_3	14.2	14.0	15.0	13.2	8.5	12.8	13.0	12.3	14.4	9.1	
CaO	17.4	10.5	11.2	13.0	13.3	14.4	13.0	10.0	11.4	9.4	
SO_3	3.9	3.9	3.1	2.6	2.8	2.8	2.4	2.0	2.5	1.7	Max. = 5.0
MgO	3.3	2.4	2.8	2.7	1.4	2.5	2.5	1.2	2.7	3.3	Max. = 5.0
Na_2O	0.9	0.8	1.0	1.3	0.9	0.7	1.2	0.6	1.1	1.3	
K_2O	2.1	2.3	2.6	2.4	2.0	2.4	3.0	3.3	2.7	2.5	
Loss on	0.8	0.7	0.5	0.6	0.3	0.9	0.7	0.8	0.1	0.1	Max. = 6.0

ที่มา : ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ. 2543. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย, น. 7-19. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมวิศวกรรมสถาณแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้ หรืออาจพบในลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งแต่งต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม สีของเถ้าลอยส่วนมากมีสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาล และสีเทาถึงดำ ขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์โดยมีขนาดเส้นผ่านจุดศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.150 มิลลิเมตร) จากจุดเด่นของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมหลังจากทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในส่วนผสมของคอนกรตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้คอนกรีตไหลได้ดี และเนื้อคอนกรีตแน่นทึบ

2.2.1.3 ประเภทของเถ้าลอย

สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a ได้กำหนดผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวต้องมีค่าอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับดังตารางที่ 3 ทั้งนี้การกำหนดดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างเพียงพอ และยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอย มีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดและเวลาในการก่อตัวได้และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวในกาเกิด Sulfate Attack ร้อยละของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) กำหนดไว้ไม่เกิดน 1.5% ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวจากผลของปฏิกิริยาระหว่างซิลิก้าในมวลรวมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวดัชนีกำลังเป็นค่าที่บ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเปรียบเทียบกำลังอัดเป็นร้อยละของมอ์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วันกับมอร์ต้าร์ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งกำหนดไว้อย่างน้อยร้อยละ 75

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), max%	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง, min %	75.0	75.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

2.2.1.4 ปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเคมี 2 ขั้นตอนด้วยกันโดยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยสารประกอบ C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้ส่วนประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$: $C_3S_2H_3$) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) : CH) ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
$$2C_3S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

ที่มา : A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, lnc. New York.

สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรททำให้ซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นวุ้น มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาร มีความเหนียว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้คุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันสนิมในเหล็ก ปฏิกิริยาปอซโลลานของเถ้าลอย หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแล้ว ปฏิกิริยาปอซโลลานจะเกิดขึ้น โดยหลักๆแล้วเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาออกไซด์ (SiO_2 :S) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทอีกดังนี้

$$xCH + yS + Zh \rightarrow C_xS_yH_{x+z}$$

ที่มา : Richard Helmuth. 1987. Fly ash in cement and concrete. Portiand cement association, Skokie

เอกสิทธิ์ และวิศว (2542) พบว่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรทที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าในซีเมนต์เพสท์ธรรมดาอันสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย โดยมีซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย 15% จะมีค่า CSH มากกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา 5% ที่อายุ 28 วันและ 10 % ที่อายุ 56 วัน

CSH จากปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง Helmuth (1987) พบว่าเมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นช่องว่างใน CSH จะเล็กลง ความหนาของชั้นเถ้าลอยลดลงตามปฏิกิริยาปอซโซลานเกิด CSHมากขึ้น กำลังจะมากขึ้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์คือ

1. เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้ากว่า (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดหรือพื้นที่ผิววัสดุปอซโซลาน)ทำให้ปริมาณความร้อนต่ำกว่า และมีการพัฒนากำลังช้ากว่า
2. เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ $Ca(OH)_2$ ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาที่ผลิต $Ca(OH)_2$ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต้องรอให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นก่อน
3. ทำให้มีตัวเชื่อมประสานมากขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทาน การต้านทานการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2.2.1.5 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ที่อายุแรกๆของตอนกรีตผสมเถ้าลอย ปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นน้อย กำลังอัดจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นส่วนใหญ่ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อยลง กำลังอัดจึงน้อยลงตามปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น Babu (1994) พบว่าสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกๆ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าลอย 15% จะไม่มีผลในการลดกำลังลงมากนักซึ่งอาจเนื่องมาจากว่าเถ้าลอยสามารถอุดช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ซึ่งกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงแรกๆสามารถประเมินได้จากปริมาณของซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (โดยจะต้องมีการปรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เนื่องจากการที่น้ำทำให้เถ้าลอยเปียกด้วย)

เมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้น การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเป็น CSH เพิ่มขึ้นอีกทำให้กำลังอัดเพิ่มมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ระยะเวลาที่กำลังแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยต้องรอ 1 เดือน ถึง 3 เดือน (Mokhtarzadeh and French, 2000) นอกจากนี้ Helmuth (1987) พบว่าการผสมเถ้าลอยจนถึง 20 % จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 3-6 เดือนมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 30 และ 40% กำลังอัดจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าคอนกรีตจะมีอายุมากกว่า 28 วันแล้วก็ตาม (Wajdi, 1983)

สำหรับการนำเถ้าลอยแม่เมาะใช้ในงานคอนกรีตนั้น สามารถนำเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 30-40% โดยน้ำหนัก ซึ่งกำลังอัดที่อายุ 28 วัน จะสูงทัดเทียม หรือสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และที่91 วัน ยังเพิ่มขึ้นอีประมาณ 15-20% จากกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (สมชัย, 2542) นอกจากนั้น ประจิต (2526) พบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% สำหรับคอนกรีตอายุ 28 และ 45วันตามลำดับโดยที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังเท่ากับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

2.2.1.6 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังดัดของคอนกรีตนั้นเป็นกำลังดึงชนิดหนึ่ง ซึ่งกำลังดึงมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมาก ถึงแม้ว่ากำลังดึงของคอนกรีตจะไม่ค่อยพิจารณาในการออกแบบ (เนื่องจากการสมมติให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้) แต่ก็มีความสำคัญเพราะการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ง่ายจากแรงดึง กำลังดึงของคอนกรีตโดยทั่วไปแบ่งตามการทดสอบได้ 3 ชนิดดังนี้

1. กำลังดึงโดยตรง (Uniaxial tensile strength) เป็นการทดสอบโดยให้แรงดึงโดยตรงกับชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีต

2. กำลังดึงบนแนวระนาบแตกร้าว (Splittting tensile strength) การทดสอบนี้ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนแล้วทดสอบโดยการอัด

3. กำลังอัด (Flexural strength) เป็นการทดสอบคานคอนกรีตซึ่งจะหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตได้ในรูปของโมดูลัสแตกร้าว

วิธีการทดสอบทั้งสามนี้ให้ค่ากำลังที่ต่างกัน โดยกำลังดัดให้ค่าสูงสุด และกำลังดึงโดยตรงให้ค่าต่ำสุด เนื่องจากกำลังดัด และกำลังดึงบนระนาบแตกร้าวจะเกี่ยวข้องกับการกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งไม่ใช่กำลังดึงที่แท้จริง Raphael (1984) พบว่ากำลังดัดมีค่ามากกว่ากำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต โดยกำลังโดยตรงของคอนกรีตมีค่าประมาณ 3ใน4 ของกำลังดัด

ผลของการใช้เถ้าลอยต่อกำลังดึงขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีต โดยในระยะแรกการผสมเถ้าลอยจะทำให้กำลังดึงลดลง และจะทำให้กำลังดึงสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น Wajdi (1983) พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย

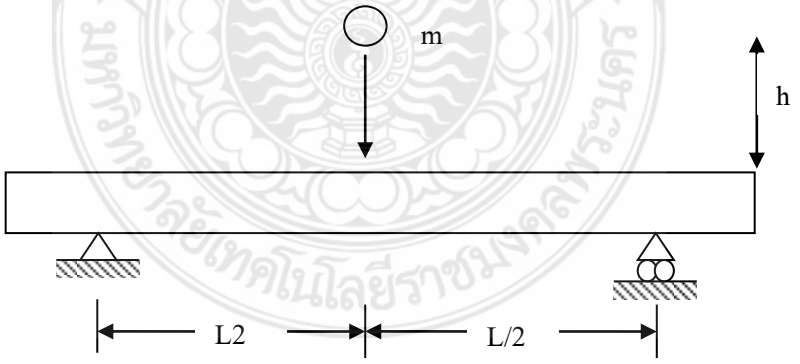
30และ40% กำลังดึง (Splitting tensile strength) จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยในระยะแรกและหลังจาก 28 วัน ส่วนในคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% กำลังดึงในช่วงแรกจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย แต่ที่ 91 วันจะมีกำลังดึงของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอายุ 28วัน Kokubu (1975) พบว่าที่อายุ 28 วันขึ้นไปคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 25% จะมีกำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยที่กำลังอัดเดียวกัน L. Lam (1998) พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วน 15-25 % จะให้ผลดีต่อกำลังดึงมากที่สุด และเมื่อผสมเถ้าลอยมากขึ้นกำลังดึงที่อายุ 28 วันและ 56 วันจะลดลงเล็กน้อย

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ อายุ กำลังอัด และชนิดของมวลรวม คอนกรีตที่อายุช่วงแรก (หรือมีกำลังต่ำ) จะมีอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดสูง เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น (หรือมีกำลังสูงขึ้น) อัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดจะลดลง เอกภพ (2541) พบว่าอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงสุดในช่วงแรก และแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตอายุมากขึ้น โดยช่วงแรกกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยละเอียดมีค่าประมาณ 10% ของกำลังอัด และหลังจาก 7 วัน กำลังดึงจะมีค่าประมาณ 8 – 9%ของกำลังอัด

กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กัน คือเมื่อกำลังอัดสูงขึ้นกำลังดัดก็จะสูงตามไปด้วย โดยอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุมาขึ้นอัตราส่วนระหว่างกำลังดัดต่อกำลังอัดจะมีค่าลดลงทั้งคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตธรรมดา โดยกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตธรรมดา จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 13 ถึง 21 ของกำลังอัด (เจริญชาย และคณะ, 2540) แต่ kasai (1983) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีต ไม่ได้ผลกระทบจากเถ้าลอยทั้ง class F และ class C

2.2.1.7 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังแรงกระแทกจะมีความสำคัญมากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำที่มีความเร็ว เช่น การตอกเสาเข็ม หรือการกระแทกเนื่องจากมวลวัตถุที่มีความเร็ว กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความสารารถในการทนต่อแรงกระแทก หรือจำนวนครั้งของกระแทก หรือการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก



ภาพที่ 8.1 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

พลังงานความเครียด (Strain energy,U)

$$U = \frac{1}{2}P.y \qquad (1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน

$$P = \frac{48EI}{L^3} \cdot y \qquad (2)$$

แทน (2) ใน (1) จะได้

$$U = \frac{24EI}{L^3} \cdot y^2 \qquad (3)$$

จากพลังงานความเครียดเท่ากับงานที่ทำโดยวัตถุมวล m จะได้

$$\frac{24EI}{L^3} \cdot y^2 = m(h+y) \qquad (4)$$

แก้สมการ (4) จะได้ y แทนใน (2) จะได้แรงสถิต (P) เทียบเท่าแรงกระแทก ดังนั้นหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทก (σ) หาได้จาก

$$\sigma = \frac{MC}{I} = \frac{(PL/4)C}{I} \qquad (5)$$

เมื่อ
- m คือน้ำหนักของวัตถุที่ปล่อยที่ความสูง h
- h คือระยะที่ทำการปล่อยวัตถุ
- L คือระยะระว่างจุดรองรับ
- E คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน
- I คือโมเมนต์อินเนอร์เชียของพื้นที่หน้าตัดคาน
- P คือแรงสถิตเทียบเท่าแรงกระแทก
- y คือการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากแรงสถิต
- M คือโมเมนต์ดัดสูงสุด
- C คือระยะแกนสะเทินถึงขอบของหน้าตัด

กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ อัตราการกระทำของแรง โดยกำลังของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราการกระทำของแรงสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่อัตราการกระทำของแรงช้า ความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการคืบ (creep) เมื่อความเครียดถึงขีดจำกัดก็จะเกิดการวิบัติ แต่ที่อัตราการกระทำของแรงสูงจะได้รับผลจากการคืบน้อยลงกำลังจึงสูงกว่า ซึ่งผลของอัตราการกระทำของแรงจะมีผลต่อการดึงโดยตรงมากที่สุด มีผลต่อการดัดปานกลาง และมีผลต่อการอัดน้อยที่สุด (Suaris และ Shah, 1983) นอกจากนี้ Zielinski และ Reinhardt (1982) พบว่ากำลังรับแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่ากำลังสถิตเสมอ เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานความเครียดได้ดีกว่า โดยในการทดสอบกำลังดึง (Splitting tensile strength) จะเห็นว่าการเพิ่มความเร็วในการกระทำของแรงต่อคอนกรีต กำลังรับแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตประมาณ 80% Harris และคณะ(2000) พบว่าอัตราส่วนกำลังดึงแบบพลศาตร์ต่อกำลังดึงแบบสถิต (Dynamic-static splitting tensile strength ratio) จะลดลงทีละน้อยเมื่อกำลังดึงมีค่าสูงขึ้น และอัตราส่วนนี้มีค่าตั้งแต่ 0.98 ถึง 1.73 m ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ซึ่งผลการทดสอบจะมีความแปรปรวนมากขึ้น

เมื่อกำลังดึงสูงขึ้น Green (1964) พบว่าการทดสอบกำลังอัดแบบแรงกระแทกจะมีการแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าการทดสอบกำลังอัดแบบสถิตย์ เพราะขณะเกิดแรงกระแทกจะมีการกระจายของหน่วยแรงไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น

กำลังแรงกระแทกยังขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตด้วย โดยความต้านทานต่อแรงกระแทกของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ และความแข็งของมวลรวมหยาบ การใช้เถ้าลอยจะมีผลกระทบความต้านทานต่อแรงกระแทกทางอ้อมจากการมีผลต่อกำลังอัด (ACI 226, 1987) แต่ Welch และ Haisman (1969) พบว่ากำลังรับแรงกระแทกมีความสัมพันธ์กับกำลังดึงของคอนกรีตมากกว่ากำลังแรงอัด ดังนั้นมวลรวมหยาบมีเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ต้าร์จะสูงขึ้นทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่า

2.2.2 วัสดุดินขาวเผา

ดินขาวเผาหรือ Metakaolin ได้จากการนำดินขาวดิบหรือ kaolin ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม โดยทั่วไปมีลักษณะของผลึกเป็นอันยรูป (Amorphous) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก ดินขาวเผามีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มากโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ดินขาวเผาจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N Raw or Calcined Pozzolans ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เมื่อทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำจะเกิดสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$; CSH) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท($3CaO.2\ Al_2O_3.3H_2O$; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีตนอกจากปฏิกิริยาเคมี (Pozzolanic Reaction) ที่เกิดขึ้นแล้ว ดินขาวเผายังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตทางกายภาพอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อคอนกรีตโดยอนุภาคของดินขาวเผาที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น ดังนั้นการใช้ดินขาวเผาผสมในคอนกรีตมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability)

2.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินขาวเผา

ลักษณะทางกายภาพของดินขาวเผาที่ชัดเจนคือเป็นผงสีส้มอ่อนที่ละเอียดมาก จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าดินขาวมีรูปร่างของอนุภาคไม่แน่นอนส่วนใหญ่เป็นแผ่นมีรูพรุนและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ดินขาวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 9 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 9800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จากการทดสอบความละเอียดโดยวิธีการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine Specific Surface Area) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 ดังแสดงในตารางที่ 2.4 อนุภาคดินขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถึง 3 เท่า ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาวเผา (ASTM C 168) ดินขาวเผามีความถ่วงจำเพาะ 2.43 ซึ่งต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ทั้งนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีองค์ประกอบของคัลเซียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่มีมวลโมเลกุลสูงอยู่ในปริมาณมาก ในขนาดที่ดินขาวเผามีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาที่มีมวลโมเลกุลต่ำอยู่ในปริมาณมาก (Sayamipuk, 2000)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาวเผา

คุณสมบัติ	ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	ดินขาว
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.43
พื้นที่ผิวจำเพาะ	3190	9800

ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2545)

2.2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของดินขาวเผา

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผาแสดงในตารางที่ 2.5 โดยมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (AL_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณร้อยละ 54.64 และ 42.87 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตามการแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 168 ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ดินขาวเผามีผลรวมร้อยละของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ 98.52 และไม่พบสารซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตซึ่งมาตรฐานกำหนดปริมาณไว้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 4 สำหรับความชื้นและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด จึงอาจจัดได้ว่าดินขาวเผาที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จัดอยู่ใน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 168

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผา

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
SiO_2	54.64
Al_2O_3	42.87
Fe_2O_3	1.01
Cao	0.01
Mgo	-
K_2O	1.16
Na_2O	-
SO_3	-
LOI	1.10

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของดินขาวเผาเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 168

คุณสมบัติ	**ประเภท N**	**ประเภทF**	**ประเภทC**	**ดินขาว**
SiO_2+Al2O_3+Fe_2O_3 ไม่น้อยกว่า (%)	70	70	50	98.52
SO_3 ไม่เกิน (%)	4	5	5	-
Moisture content ไม่เกิน (%)	3	3	3	0.45
Loss on ignition (LOI) ไม่เกิน (%)	10	6	6	1.10
Specific gravity	2.10-2.58	2.10-2.58	2.10-2.58	2.43
Blaine fineness, cm2/g	2400-4800	2400-4800	2400-4800	9800

2.2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวดิบ ($Al_2Si_2O_3$ (OH_4)) จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ การนำดินขาวดิบมาผสมกับคอนกรีตโดยตรงอาจทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอน จากผลวิจัยของ Sayamipuk (2543) พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าผสมดินขาวดิบที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนโดยการนำดินขาวดิบมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้โครงสร้างภายในมีการเปลี่ยนแปลงกลายสภาพเป็นดินขาว ($Al_2O_3.2SiO_2$; AS_2) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ผสมคอนกรีต ดังสมการ (Salvador, 1995)

$$Al_2Si_2O_3\,(OH)_4 \xrightarrow{\text{ความร้อน}} Al_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O$$

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวดิบมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส (Nevill , 1996) และจากการวิจัยของ Murat and Comel (1983) ที่ทำการศึกษาวิธีการและอุณหภูมิในการเผาดินขาวโดยทำการทดลองเผาดินขาวดิบด้วยวิธีการเผาแบบถังนิ่ง (Fixed-Bed) และแบบถังกวน (Stirred-Bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary Klin) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 700-800 องศาเซลเซียส สำหรับวิธีการเผาแบบถังนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของดินขาวผสมคัลเซียมไฮดรอกไซค์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7-90 วัน สูงกว่ากำลังอัดของดินขาวจากวิธีการเผาแบบถังกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผาคือ 3 ชั่วโมง

สำหรับในประเทศไทยมีการรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดย อนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และลำปาง โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700,800,900 และ 1000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผาคือ 4,6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่าง

ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาวเผาจากแหล่งปราจีนบุรีให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750,800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส

2.2.2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชชั่นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ ทำให้ได้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทและคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท ในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ (Mindess, 1981)

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \rightarrow 3CaO_2.SiO_2.3H_2O$$

และ $$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO_2.Al_2O_3.3H_2O$$

Murat (1983) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวเผา โดยผสมดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส กับน้ำและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดสารประกอบ C_4AH_{13}, C_3AH_6, C_2ASH_8 และ CSH ซึ่งชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้น โดยสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

AS_2 + 6CH + 9H $\rightarrow$ C_4AH_{13} + 2CSH
(Metakaolin) (Lime) (Water) (Tetracalcium Aluminate Hydrate) (Calcium Silicate Hydrate)

AS_2 + 5CH + 9H $\rightarrow$ C_4AH_6 + 2CSH
(Metakaolin) (Lime) (Water) (Tricalcium Aluminate Hydrate) (Calcium Silicate Hydrate)

AS_2 + 3CH + 9H $\rightarrow$ C_2ASH_8 + CSH
(Metakaolin) (Lime) (Water) (Hydrate Gehlenite) (Calcium Silicate Hydrate)

ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น

มีรายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณดินขาวเผาที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาว และปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Oriol and Pera, 1995; Wild and Khatib, 1997; Kostuch et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30-40 สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดภายในเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ผลการศึกษาของ Wild et al. (1997) พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม เป็น 15000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม จะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดในระยะยาว (90วัน)

2.2.2.5 ผลกระทบของดินขาวต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังอัดที่ระดับหนึ่งแต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานร่วมผสมในคอนกรีตทั้งโดยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือวิธีผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต (Addition Method) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานชนิดนั้นๆ (ธีรราช และชัย, 2543)

Wild et al. (1996) ศึกษาผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1-90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของ Microfiller Effect ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7-14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

Curcio et al. (1998) ทำการศึกษาค่ากำลังของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิก้าฟูม (Silica Fume) ในปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เท่ากัน และพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าผสมซิลิก้าฟูม โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วงวันแรก แต่ในระยะยาว (90-180 วัน) ค่ากำลังจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและจากการวิเคราะห์ Differential Thermal Analysis (DTA) หาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซค์พบว่าดินขาวที่ใช้การทดลองมีความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกับซิลิก้าฟูม

Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาว จากการทดลองพบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่ช่วงอายุเริ่มต้นจะช้าแต่ในระยะยาวการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมดินขาวจะให้ค่ากำลังอัด

เพิ่มขึ้นกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้คอนกรีตผสมดินขาวที่บ่มในอุณหภูมิสูงจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงต้นเร็วขึ้น แต่ในระยะยาวอุณหภูมิไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัด

Sayamipuk (2000) ได้ศึกษาดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองในประเทศไทย โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการทดลองมอร์ต้าผสมดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักตัว ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ทั้งนี้นอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้น อนุภาคของดินขาวยังมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า เนื่องมาจากผลของ Microfiller Effect และจากการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในปริมาณที่เท่ากันโดยมีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันคือ 0.40 และ 0.50 พบว่าค่ากำลังของมอร์ต้าที่อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะสูงกว่า 0.50 เนื่องจากอนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าและช่วยปรับปรุงในส่วนของ Interfacial Zone นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่าการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลของดินขาวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ในช่วงอายุเริ่มต้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น (Wild et al. 1996)

2.2.2.6 ผลกระทบของดินขาวต่อความซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของคอนกรีต

คลอไรด์ (Chloride) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ทำให้ passivity layer ที่เคลือบอยู่รอบผิวเหล็กเสริมซึ่งมีผลต่อการป้องกันต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเกิดความเสียหาย เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

ผลกระทบการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กในการรับแรงลดลง นอกจากนี้การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กมีปริมาตรมากกว่าเหล็กเดิมประมาณ 6 เท่า ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริม (Splitting Crack) การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้นทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความซึมน้ำต่ำมากๆเช่นการใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำหรือการใช้สารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย และซิลิก้าฟูมจะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น

Balaguru (2001) ศึกษาค่าการต้านทานคลอไรด์ โดยวิธี Rapid Chloride Permeability ในคอนกรีตที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 ผสมกับดินขาว และพบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวจะมีค่าการซึมได้ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้ค่าการซึมได้ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1

Khatib and Wild (1996) ศึกษาปริมาณและขนาดของช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, และ 15 แทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำและวัสดุประสานที่ 0.55 และบ่มชื้นในช่วงเวลา 3-365 วัน พบว่าปริมาณของช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของดินขาวและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของช่องว่างขนาดใหญ่ (รัศมีมากกว่า

20 nm) ลง และปริมาณของช่องว่างขนาดเล็ก (รัศมีน้อยกว่า 20 nm) มีจำนวนมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น

Sayamipuk (2000) ทดสอบว่าการซึมผ่านของน้ำในมอร์ต้าผสมดินขาวโดยใช้มาตรฐาน JIS A1401-1994 การทดสอบใช้ดินขาวผสมแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน จากการทดสอบพบว่าค่าการซึมผ่านของน้ำในมอร์ต้าจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของดินขาวเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจาก Microfiller Effect ซึ่งเป็นการปรับปรุงช่องว่างในมอร์ต้าให้ทึบแน่นขึ้น

2.2.2.7 เวลาที่เหมาะสมในการบดดินขาว

เมื่อนำดินขาวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาบดเป็นระยะเวลา 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ชั่งโมง ได้ค่าความละเอียดโดยวิธีวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine Specific Surface Area) ดังแสดงในตารางที่ 2.7 พบว่าเมื่อใช้เวลาการบดเพิ่มขึ้น ดินขาวจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดและค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ผ่านการบดในช่วงเวลาดังกล่าวในตารางที่ 2.8 ค่ากำลังอัดและค่ากำลังอัดสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการบดดินขาวเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่ากำลังอัดและค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ผันแปรตามพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะจะทำให้ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ของดินขาวสูงขึ้นรวมถึงอิทธิพลจาก Microfiller Effect

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ที่อายุ 28 วัน ของมอร์ต้าผสมดินขาว เมื่อเวลาในการบดเพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยดินขาวที่บด 1.5 ชั่วโมงจะมีพื่นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินขาวที่บด 1.0 ชั่วโมงถึงร้อยละ 14 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบดมากขึ้นกลับพบว่าดินขาวมีพื้นที่จำเพาะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทั้งนี้อาจเป็นเพราะขีดจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการบด อย่างไรก็ตามดินขาวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงย่อมให้ผลที่ดีทั้งทางด้านการพัฒนากำลังอัดและความคงทน (Wild et al., 1997; Sayamipuk, 2000) ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งค่ากำลังอัดสัมพัทธ์และพื้นที่ผิวจำเพาะจึงสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมในการบดดินขาวในการศึกษานี้คือ 1.5 ชั่วโมง ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 9800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 2.7 ค่าความละเอียดของดินขาวที่บดในช่วงเวลาต่างๆ

เวลาในการบด (ชั่วโมง)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)
1.0	8580
1.5	9800
2.0	10700
2.5	11480

ตารางที่ 2.8 ค่ากำลังอัดและค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ผ่านการบดในช่วงเวลาต่างๆ

เวลาในการบด (ชั่วโมง)	กำลังอัด (กก.ต่อ ตร.ซม.) 7 วัน	กำลังอัด (กก.ต่อ ตร.ซม.) 28 วัน	กำลังอัดสัมพัทธ์ (%) 7 วัน	กำลังอัดสัมพัทธ์ (%) 28 วัน
มอร์ต้าควบคุม	292	395	100.0	100.0
1.0	341	447	116.8	113.2
1.5	350	465	119.9	117.7
2.0	351	468	120.2	118.5
2.5	355	472	121.6	119.5

บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้เป็นการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบอื่นๆที่เกี่ยวข้องในวิจัยนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15

3.1.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 1.30, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 4.00 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.65

3.1.3 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.34 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.00, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.70 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600 kg/m3

3.1.4 น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water) มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.5 วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาวและผงซิลิก้า) (เถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้า จ.ลำปาง และดินขาวเผาสำเร็จรูป นำเข้าจากสหัฐอเมริกา บริษัท Metamax จำกัด

3.1.6 สารลดน้ำพิเศษประเภท (Superplasticizer)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 เครื่องชั่ง มีความละเอียด 0.05 กก.

3.2.2 น้ำยาผสมคอนกรีตเพื่อลดปริมาณน้ำ superplasticising

3.2.3 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.4 เหล็กกระทุ้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม. ปลายกลมมน

3.2.5 แผ่นเหล็กสำหรับรองคอนกรีต และ mold ในการทดสอบค่ายุบตัว

3.2.6 เกรียงเหล็ก ช้อนตัก และตลับเมตร

3.2.7 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 4x4x16 ซม., 10x10x40 ซม. และ ขนาดหน้าตัด 10×20 ซม.

3.2.8 เครื่องCompression ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.2.9 เครื่องทดสอบการรับแรงดัดคอนกรีต พร้อมฐานรองรับที่มีระยะระหว่างจุดรองรับ 20 ซม.

3.2.10 เครื่อง UTM ทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต

3.2.11 เครื่องทดสอบรับแรงกระแทกแบบลูกตุ้ม (pendulum)

3.3 วิธีการที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 การออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม

ออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามวิธีที่เสนอใน ACI 211.1-91 ให้ได้ค่าความยุบตัวของคอนกรีตในช่วง 3-5 ซม. และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 แล้วแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0, 15, 30 และ 45% โดยน้ำหนัก และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว 0, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก โดยควบคุมค่า slump และ w/c ให้คงที่

3.3.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตควบคุม

ตรวจความยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 143-90a “Test method for hydraulic cement concrete”

3.3.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 4 : 1970 “Methods of testing concrete for Strength” โดยหล่อชิ้นตัวอย่างด้วยแบบหล่อคอนกรีตขนาด หน้าตัด $\pi\ 5^2$ ยาว 20 ซม. ทำการบ่มชิ้นตัวอย่างต่อเนื่องที่ 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังอัด โดยวางชิ้นตุวอย่างที่กึ่งกลางแท่นทดสอบให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นทดสอบ ให้แรงอัดสม่ำเสมอประมาณ 2.55กก./ตร.ซม./วินาที จนชิ้นตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ หาค่ากำลังอัดของชิ้นตัวอย่างจากการนำค่าที่บันทึกได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง

3.3.4 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 4 : 1970 โดยหล่อชิ้นตัวอย่างหน้าตัด 10x10x40 ซม.ทำการบ่มชิ้นตัวอย่างต่อเนื่องที่ 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังดัด โดยวางชิ้นตัวอย่างบนแท่นรองรับที่มีระยะระหว่างจุดรองรับ 20 ซม. แล้วให้น้ำหนักกดลงบนจุดกึ่งกลางของช่วงคานด้วยอัตราประมาณ 0.27 กก./ตร.ซม./วินาที จนชิ้นตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าที่ได้แล้วหาค่ากำลังดัด (f_b) ได้จาก

$$f_b = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ กก./ตร.ซม.}$$

เมื่อ P = น้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อคาน(กก.)

B = ความกว้างของชิ้นตัวอย่างวัดที่บริเวณรอยแตก (ซม.)

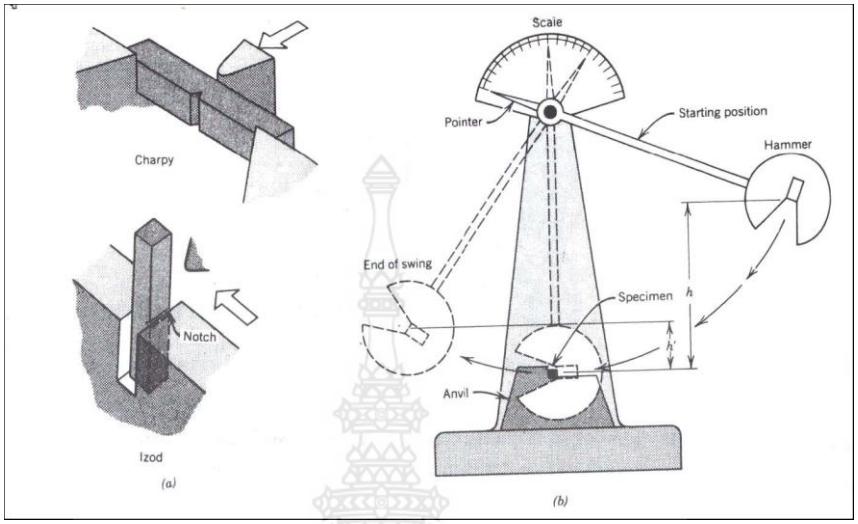
d = ความลึกของชิ้นตัวอย่างวัดที่บริเวณรอยแตก (ซม.)

L = ระยะระหว่างฐานรองรับของแท่นทดสอบ (ซม.)

3.3.5 การทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีต

ทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีต โดยหล่อชิ้นตัวอย่างด้วยแบบหล่อคอนกรีตขนาด 4x4x16 ซม.ทำการบ่มชิ้นตัวอย่างต่อเนื่องที่ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยเครื่องกระแทกแบบลูกตุ้ม (Pendulum) โดยการวางชิ้นตัวอย่างบนแท่นรองรับซึ่งมีระยะห่าง เซนติเมตร และนำแท่งอลูมิเนียมใส่ลงในช่องที่แท่นรองรับซ้ายมือซึ่งมีลูกบอลแบริ่งอยู่ด้านในเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับ แล้วยกลูกตุ้มซึ่งมีน้ำหนัก 15 กก. ขึ้นมาอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดโดยมีสลักยึดไว้ ซึ่งในการทดสอบนี้จะยกลูกตุ้มที่ความสูง 17.5 ซม. เมื่อต้องการทดสอบให้ปล่อยสลัก ลูกตุ้มก็จะตกลงมากระแทกชิ้นตัวอย่าง ดังนั้น

พลังงานจากลูกตุ้มเท่ากับ 262.5 กิโลกรัม.เซนติเมตร เมื่อลูกตุ้มตกกระแทกชิ้นตัวอย่างหักก็จะเหวี่ยงขึ้นมาอีกด้านหนึ่ง ทำให้สามารถอ่านค่าพลังงานที่ต้องใช้ไปในการทำให้ชิ้นตัวอย่างหักได้โดยตรงจากสเกล ส่วนแรงที่เกิดขึ้นที่แท่นรองรับสามารถหาได้จากขนาดของรอยกดบนแท่งอลูมิเนียม ถ้าอลูมิเนียมมรอยกดขนาดใหญ่ก็จะเกิดแรงที่แท่นรองรับมาก



ภาพที่ 3.1 แสดงการทดสอบแรงกระแทก (a) แสดงตัวอย่างที่ใช้ Charpy and Izad test

(b) แสดงภาพวาดของเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต (slump = 3-5 cm) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

ปริมาณส่วนผสมคอนกรีต กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	W/C	ดินขาว (kg)	เถ้าลอย (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)
M/Control	0.40	0	0	450	160	769	961
M/FA15%	0.40	0	67.5	382.5	160	769	961
M/FA30%	0.40	0	135	315	160	769	961
M/FA45%	0.40	0	202.5	247.5	160	769	961
M/MK10%	0.40	45	0	405	160	769	961
M/MK15%	0.40	67.5	0	382.5	160	769	961
M/MK20%	0.40	90	0	360	160	769	961

ตารางที่ 3.2 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต (slump = 3-5 cm) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

ปริมาณส่วนผสมคอนกรีต กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร							
ส่วนผสม	W/C	ดินขาว (kg)	เถ้าลอย (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)
M/Control	0.45	0	0	450	203	731	961
M/FA15%	0.45	0	67.5	382.5	203	731	961
M/FA30%	0.45	0	135	315	203	731	961
M/FA45%	0.45	0	202.5	247.5	203	731	961
M/MK10%	0.45	45	0	405	203	731	961
M/MK15%	0.45	67.5	0	382.5	203	731	961
M/MK20%	0.45	90	0	360	203	731	961

3.4 ผลการทดลอง

3.4.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย,ดินขาว

กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 354,364 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 364,371 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 328,382 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 224,237 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง กระทั่งถึงคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% กำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ,30% ที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 299,305 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 259,289 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 221,307 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 249,255 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วันกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น กระทั่งถึงคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% กำลังอัดของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 354,364 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 308,375 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 330, 362 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 342,354 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง แต่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงตาม

ปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 299,305 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 320,327 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 314,315 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 312,352 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดลดลงตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

3.4.2 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย,ดินขาว

กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 31.74,32.48 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 30.02, 31.08 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 29.35,30.01 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 22.26,23.85กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 27.69,27.39 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 26.11, 28.56 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 25.40,27.22 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 19.24,23.32 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 31.74,32.48 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 34.62,40.99 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 31.44, 37.23 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 24.47,24.70 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นและหยุดลงที่คอนกรีตผสมดินขาว 20% และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10%, 15% มีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 27.69, 27.39 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 28.40,41.55 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 30.20,40.35 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 30.07,42.26 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของ

คอนกรีตที่ 14 วัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นและหยุดลงที่คอนกรีตผสมดินขาว 20% และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

3.4.3 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 108 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 105 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 110 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 98 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ78.5 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 76 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 75 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 76 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 108 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 111 J พลังงานกระแทกคอนกรีตดินขาว 15% เท่ากับ 100 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 95 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมดินขาว

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 78.5 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 81 J พลังงานกระแทกคอนกรีตดินขาว 15% เท่ากับ 79 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 70 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมดินขาว

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว

4.1.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตธรรมดาเท่ากับ 354 และ 364 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 เท่ากับ 364 และ 371 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เท่ากับ 328 และ 382 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 45 เท่ากับ 224 และ 237 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง กระทั่งถึงคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 45 กำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 ที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย

4.1.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 299,305 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 259,289 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 221,307 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 249,255 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วันกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น กระทั่งถึงคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% กำลังอัดของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

4.1.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 354,361 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 308,375 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 330,362 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 342,354 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง แต่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

4.1.4 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 299,305กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 320,327 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 314,315 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 312,352 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดลดลงตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่ม

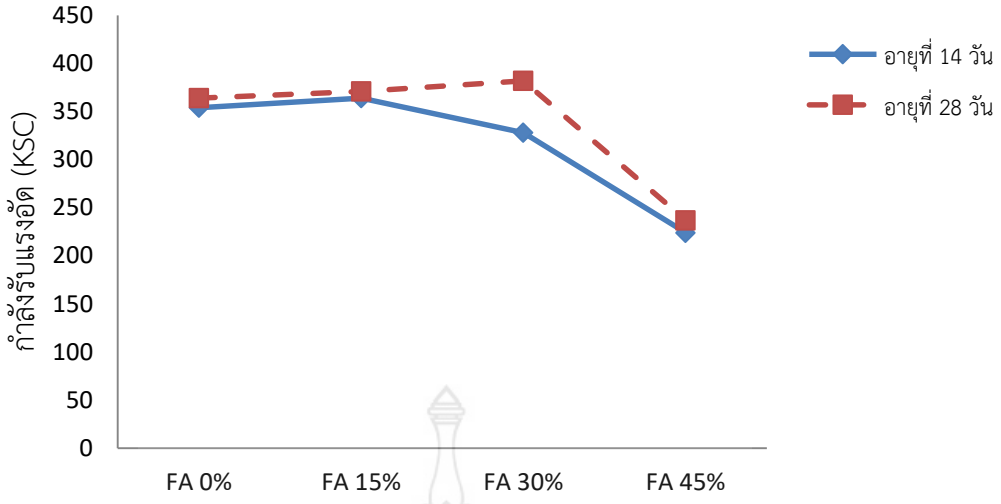
ตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

ตารางที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอย

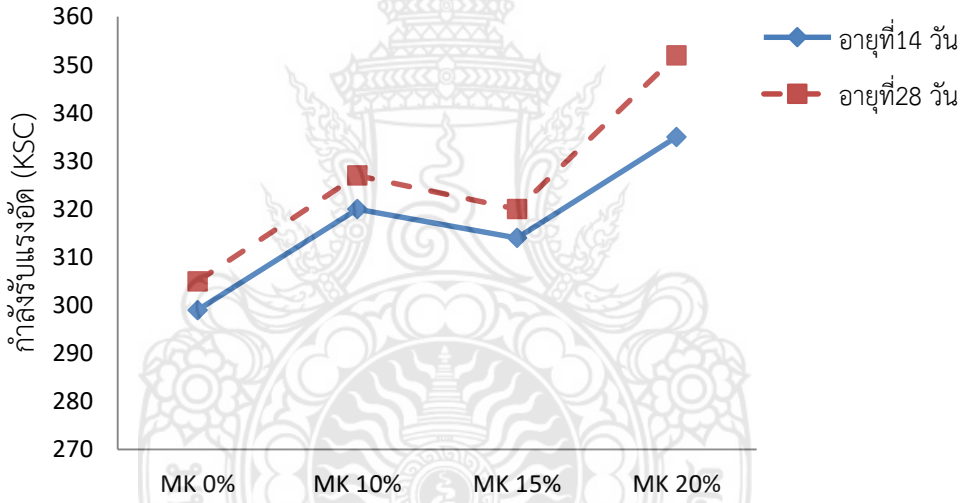
W/B	% Fly ash replacement	Compressive strength (ksc.)	
		14 days	28 days
0.40	0	354	364
	15	364	371
	30	328	382
	45	224	237
0.45	0	299	305
	15	259	289
	30	221	307
	45	249	255

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาว

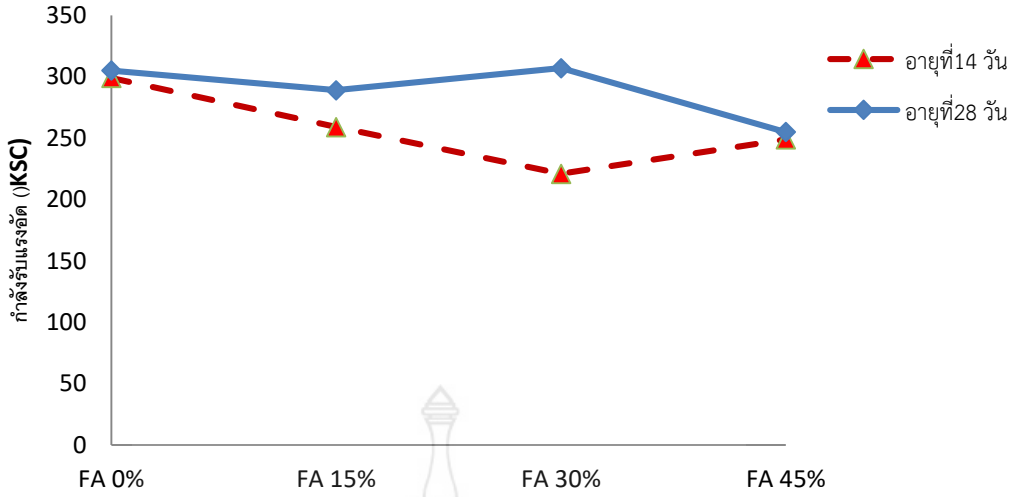
W/B	% Kaolin replacement	Compressive strength (ksc.)	
		14 days	28 days
0.40	0	354	361
	10	308	375
	15	330	362
	20	342	354
0.45	0	299	305
	10	320	327
	15	314	320
	20	335	352



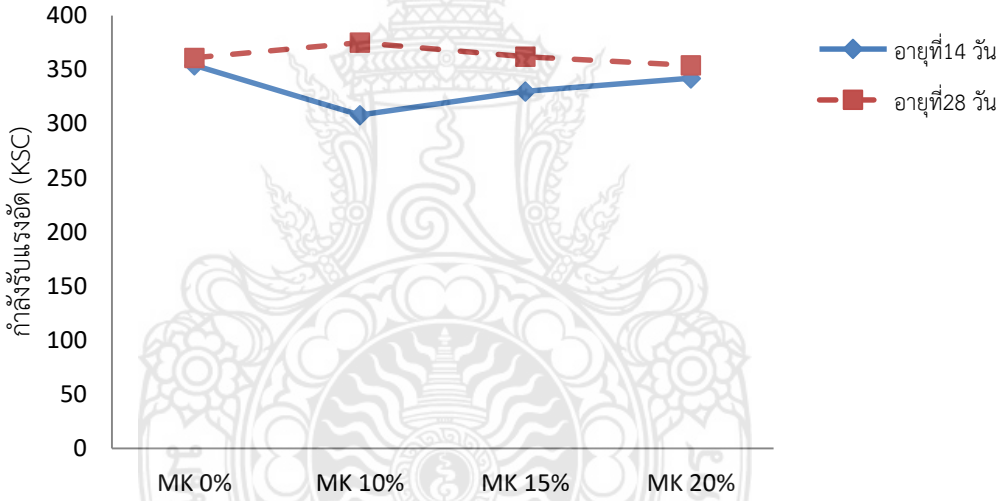
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุ ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

4.2 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย, ดินขาว

4.2.1 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 31.74,32.48 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 30.02,31.08 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 29.35, 30.01 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 22.26,23.85กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

4.2.2 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 27.69, 27.39 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 26.11, 28.56 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 25.40, 27.22 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 19.24, 23.32 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

4.2.3 กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 31.74, 32.48 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 34.62, 40.99 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 31.44 , 37.23 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 24.47, 24.70 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นและหยุดลงที่คอนกรีตผสมดินขาว 20% และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10%,15% มีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

4.2.4 กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 27.69, 27.39 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 28.40, 41.55 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% เท่ากับ 30.20, 40.35 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 30.07,42.26 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้นและหยุดลงที่คอนกรีตผสมดินขาว 20% และกำลังดัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมดินขาว

ตารางที่ 4.3 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอายุ 14 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยต่างๆ

W/B	% Fly ash replacement	Flexural strength (ksc)
0.40	0	31.74
	15	30.02
	30	29.03
	45	22.26
0.45	0	27.69
	15	26.11
	30	25.2
	45	19.24

ตารางที่ 4.4 กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 14 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาวต่างๆ

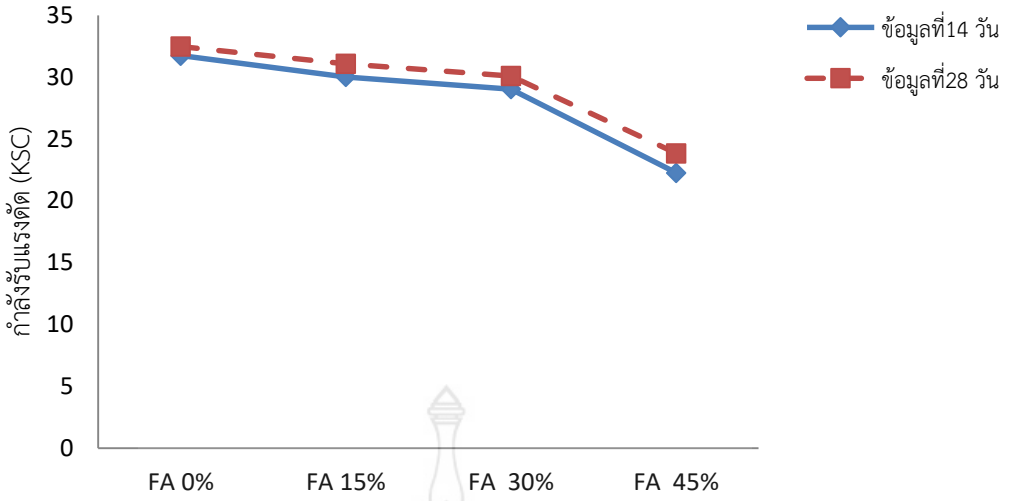
W/B	% Kaolin replacement	Flexural strength (ksc)
0.40	0	31.74
	10	34.62
	15	31.44
	20	24.47
0.45	0	27.69
	10	28.40
	15	30.20
	20	30.07

ตารางที่ 4.5 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยต่างๆ

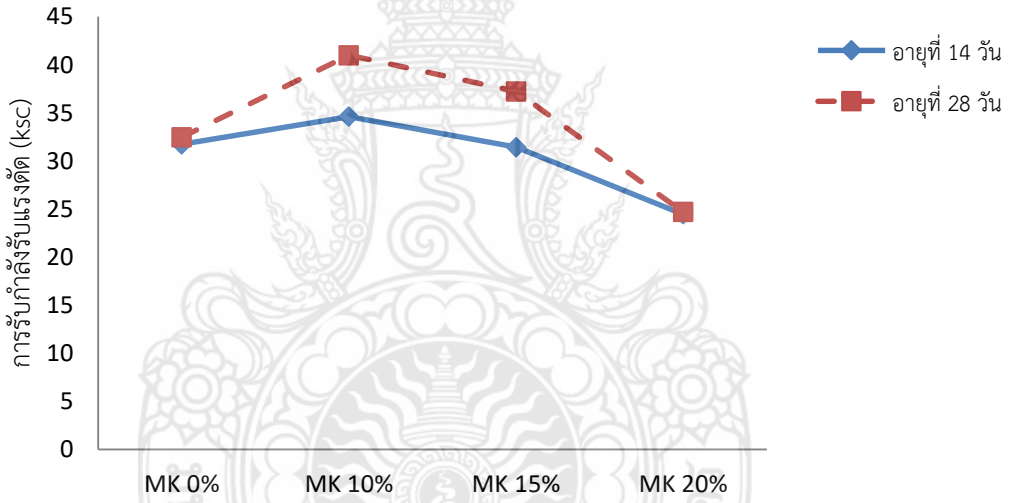
W/B	% Fly ash replacement	Flexural strength (ksc)
0.40	0	32.48
	15	31.08
	30	30.1
	45	23.85
0.45	0	27.39
	15	28.56
	30	27.22
	45	23.32

ตารางที่ 4.6 กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมดินขาวต่างๆ

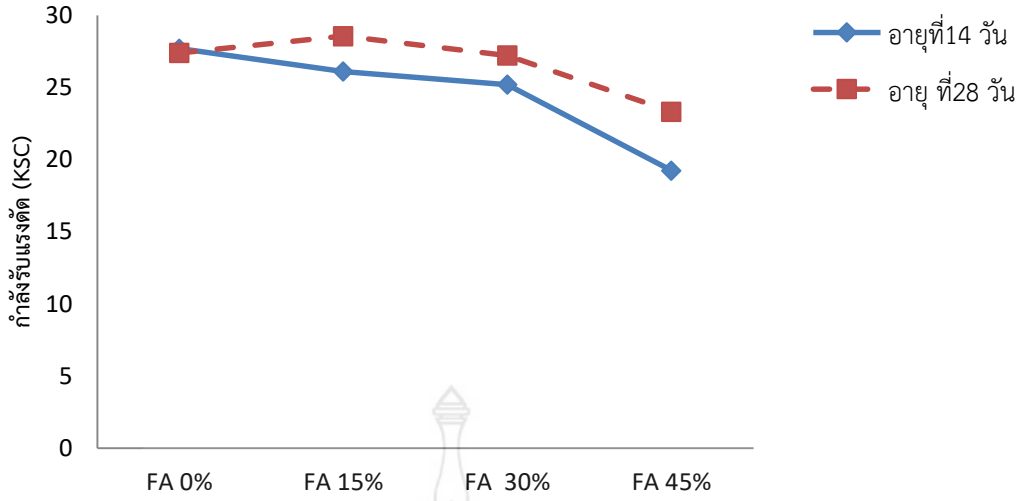
W/B	% Kaolin replacement	Flexural strength (ksc)
0.40	0	32.48
	10	40.99
	15	37.23
	20	24.70
0.45	0	27.39
	10	41.55
	15	40.14
	20	42.26



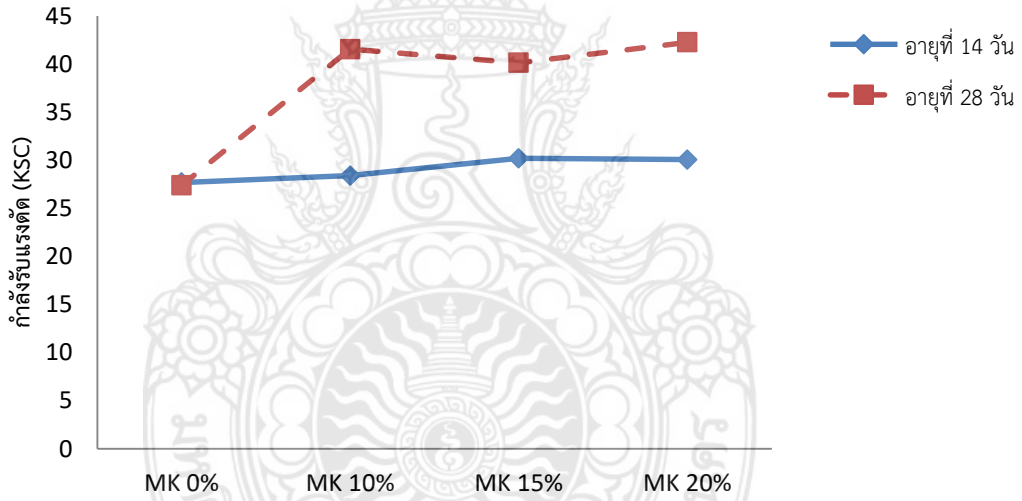
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุของเถ้าลอย ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดชองคอนกรีตกับอายุของดินขาว ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุของเถ้าลอย ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดชองคอนกรีตกับอายุของดินขาว ทีมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

4.3 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว

4.3.1 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ 108 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 105 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 110 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 98 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยเท่ากับ78.5 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% เท่ากับ 76 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% เท่ากับ 75 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% เท่ากับ 76 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

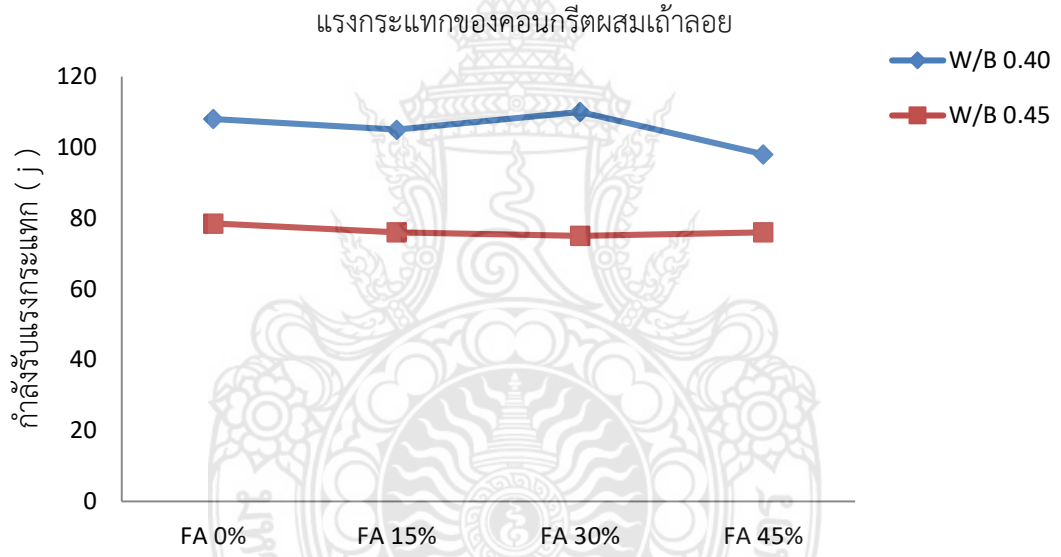
ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 108 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 111 J พลังงานกระแทกคอนกรีตดินขาว 15% เท่ากับ 100 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 95 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมดินขาว

กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

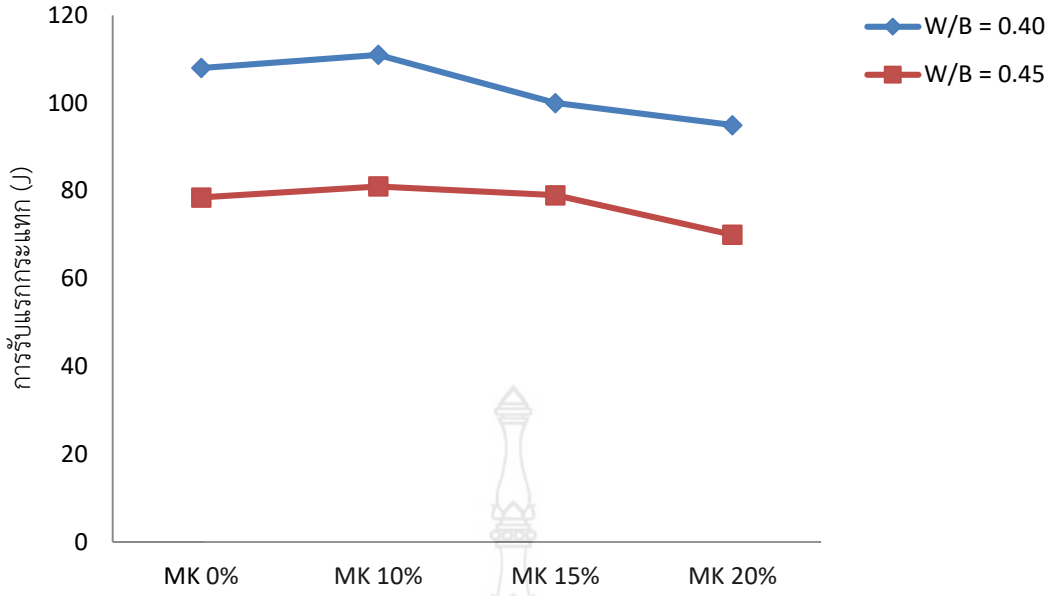
ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกประกอบด้วย พลังงานกระแทกคอนกรีตไม่ผสมดินขาวเท่ากับ 78.5 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 10% เท่ากับ 81 J พลังงานกระแทกคอนกรีตดินขาว 15% เท่ากับ 79 J พลังงานกระแทกคอนกรีตผสมดินขาว 20% เท่ากับ 70 J จะเห็นได้ว่าพลังงานกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตไม่ผสมดินขาว

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมดินขาวอายุ 28 วันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนการผสมเถ้าลอยและผสมดินขาวต่างๆ

Type of Concrete	Drop Weight 15 kg Impact Energy (N.m) (j) Failure
M/Control	108
M/FA15	105
M/FA30	110
M/FA45	98
M/MK10	111
M/MK15	100
M/MK20	95



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงกระแทกของคอนกรีตกับอายุ 28 วัน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงกระแทกของคอนกรีตกับอายุ 28 วัน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45

4.4 วิจารณ์

4.4.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

จากผลการทดสอบกำลังอัด จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ โดยกำลังอัดมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วใน14วันแรก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง

กำลังอัดช่วง 14 ถึง 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ 28 วัน ยังคงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยทุกสัดส่วนการผสมเถ้าลอย ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การผสมเถ้าลอย15%ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยกำลังอัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง ในช่วงแรกของคอนกรีตนั้นการผสมเถ้าลอยทำให้กำลังอัดลดลง โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะมีกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะได้รับผลกระทบของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการลดลงของกำลังอัดในช่วงแรกและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะหลังมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก

ความเหมาะสมในการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตทางด้านราคา

การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดในระยะแรกมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ทำให้ต้องใช้เวลาในการบ่มนานขึ้นจึงจะมีกำลังอัดที่เท่ากับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย การที่จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย สามารถทำได้โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงซึ่งจะทำให้ใช้วัสดุประสานในปริมาณที่มากขึ้น แต่อาจจะเป็นทางเลือกที่คุ้มค่ากว่าถ้าราคาวัสดุประสานที่ได้มีราคาถูกกว่าซีเมนต์อย่างเดียวที่ใช้ในการไม่ผสมเถ้าลอย จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อกำหนดกำลังอัดที่ต้องการสามารถหาปริมาณวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15,30 และ 45% ได้ การเปรียบเทียบว่ากำลังอัดเดียวกันนั้น การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะใช้วัสดุประสานในราคาที่ถูกกว่าการใช้ซีเมนต์อย่างเดียวในคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยหรือไม่ สามารถทำได้โดยเปลี่ยนน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เป็นน้ำหนักซีเมนต์ที่ราคาเดียวกัน แล้วนำค่าน้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย15,30 และ 45% มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักซีเมนต์ของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

น้ำหนักวัสดุประสานนั้นประกอบด้วยน้ำหนักของซีเมนต์และน้ำหนักของเถ้าลอย การหาน้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ ทำได้โดยการหาร้อยละของราคาเถ้าลอยต่อราคาซีเมนต์ (ปัจจุบันเถ้าลอยมีราคาประมาณ 1000บาทต่อตันบวกค่าขนส่งและปูนซีเมนต์ประเภทที่สามมีราคาประมาณ2000บาทต่อตันบวกค่าขนส่ง) ในที่นี้กำหนดค่าที่ 20 , 30 และ 40% (การกำหนดร้อยละของราคาเถ้าลอยต่อราคาซีเมนต์เป็น3ค่า เนื่องจากว่าในอนาคตนั้นราคาของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์อาจเปลี่ยนแปลงได้) จากนั้นเปลี่ยนน้ำหนักเถ้าลอยให้เป็นน้ำหนักซีเมนต์ที่มีราคาเดียวกัน ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย แล้วนำน้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย รวมกับซีเมนต์ในวัสดุประสานนั้น จะได้น้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของวัสดุประสาน ดังนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน กับน้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ได้ เมื่อเถ้าลอยมีราคาเท่ากับ 20 , 30 และ 40% ของราคาซีเมนต์

ตัวอย่าง การเปลี่ยนน้ำหนักวัสดุประสานให้เป็นน้ำหนักซีเมนต์ที่ราคาเดียวกัน(W’c)

สมมติว่าวัสดุประสาน 300 กก. ประกอบด้วยซีเมนต์ 210 กก. และเถ้าลอย 90 กก. และเถ้าลอยมีราคาเท่ากับ 30% ของราคาซีเมนต์

น้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของเถ้าลอย (W’f) = 0.30x90

= 27 กก.

ดังนั้น น้ำหนักเทียบเท่าซีเมนต์ของวัสดุประสาน (W’c) = 210 + 27

= 237 กก.

จะเห็นได้ว่าสำหรับการกำหนดกำลังอัดที่อายุ 28 วัน การใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะสามารถประหยัดค่าวัสดุประสานได้มากขึ้นเมื่อมีการกำหนดกำลังอัดที่อายุสูงขึ้น

4.4.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว

จากผลการทดสอบกำลังอัด จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ โดยกำลังอัดมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วใน 14 วันแรก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง

กำลังอัดช่วง 14 ถึง 28 วันของคอนกรีตผสมดินขาวจะมีกำลังอัดที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของดินขาว สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวที่ 28 วัน ยังคงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตไม่ผสมดินขาวทุกสัดส่วนการผสมดิน

ขาว ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การผสมดินขาว15%ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมดินขาวจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยกำลังอัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง ในช่วงแรกของคอนกรีตนั้นการผสมดินขาวทำให้กำลังอัดลดลง โดยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะมีกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก ซึ่งเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะได้รับผลกระทบของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการลดลงของกำลังอัดในช่วงแรกและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะหลังมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก

4.4.3 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่14วันจะลดลงตามปริมาณการผสมเถ้าลอยที่มากขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะเห็นได้ว่ากำลังดัดมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

โดยรวมแล้วกำลังดัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ากำลังอัดที่มากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้แบบเดียวกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดจะมีค่าคงที่ในช่วงที่กำลังอัดต่ำกว่า250 กก./ตร.ซม. หลังจากนั้นอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดจะลดลงตามค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น

จากการทดลองจะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่ค่า 8 % ของกำลังอัด และกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่า 7 ถึง 11% ของกำลังอัด ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย การใช้เถ้าลอยไม่มีผลต่ออัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดสำหรับที่กำลังอัดต่างๆ แต่การผสมเถ้าลอยจะทำให้อัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตทำให้กำลังอัดลดลง

4.4.4 กำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตที่ 14 วันจะลดลงตามปริมาณการผสมดินขาวที่มากขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะเห็นได้ว่ากำลังดัดมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว

โดยรวมแล้วกำลังดัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมดินขาวจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ากำลังอัดที่มากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดของคอนกรีตและคอนกรีตผสมดินขาวได้แบบ

เดียวกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดกับกำลังอัดจะมีค่าคงที่ในช่วงที่กำลังอัดต่ำกว่า 250 กก./ตร.ซม. หลังจากนั้นอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดจะลดลงตามค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น

จากการทดลองจะเห็นได้ว่ากำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่ค่า 8 % ของกำลังอัด และกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่า 7 ถึง 12% ของกำลังอัด ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมดินขาว การใช้ดินขาวไม่มีผลต่ออัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดสำหรับที่กำลังอัดต่างๆ แต่การผสมดินขาวจะทำให้อัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมดินขาวในคอนกรีตทำให้กำลังอัดลดลง

4.4.5 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย,ดินขาว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ผลการกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมและคอนกรีตผสมเถ้าลอย จะเห็นได้ว่าการผสมเถ้าลอยไม่มีผลกระทบที่เด่นชัดต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย แต่กำลังรับแรงกระแทกจะมีผลความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า โดยในคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยกำลังรับแรงกระแทกจะสูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทั้งนี้คอนกรีตผสมเถ้าลอยสามารถรับกำลังรับแรงกระแทกได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมดินขาว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ผลการกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมและคอนกรีตผสมดินขาว จะเห็นได้ว่าการผสมดินขาวไม่มีผลกระทบที่เด่นชัดต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวแต่กำลังรับแรงกระแทกจะมีผลความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า โดยในคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมดินขาวกำลังรับแรงกระแทกจะสูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุป

จากผลการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัด กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่สามผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่สามผสมดินขาว สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การผสมเถ้าลอยในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตและกำลังดัดของคอนกรีตลดลงแต่ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีต และการผสมดินขาวในปริมาณ 10% และ 15% ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตและกำลังดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่อผสมดินขาวในปริมาณ 20% แต่ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีต

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีต, กำลังดัดของคอนกรีตและกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตลดลงจะส่งผลให้กำลังดัดของคอนกรีตลดตามไปด้วย แต่ ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีต

5.1.3 ความสัมพันธ์ของอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมดินขาวมีกำลังอัด, กำลังดัดและกำลังรับแรงกระแทกมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตนั้นล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสิ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของปัจจัยเหล่านั้น เช่น ขนาดของมวลรวมหยาบ คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของดินขาว และสารลดน้ำ นอกจากนี้การเร่งกำลังของคอนกรีตด้วยน้ำก็เป็นปัจจัย

5.2.2 ขนาดของชิ้นตัวอย่างนี้ใช้ในการทดลองนี้ใช้เพียงขนาดเดียว การศึกษาเกี่ยวกับผลของขนาดชิ้นตัวอย่างต่อคุณสมบัติของคอนกรีตจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ควรให้ความสำคัญเพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้แม่นยำ

5.2.3 ในการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตนั้นทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักที่ความสูงเดียว จึงเป็นการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ความเร็วค่าเดียว ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ความเร็วต่างๆกัน

5.2.4 ในการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตนั้นทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักเพียงน้ำหนักเดียว จึงไม่มีข้อเปรียบเทียบที่มากกว่าหนึ่งในน้ำหนักของลูกตุ้มน้ำหนัก

บรรณานุกรม

เจริญชาย ตั้งฉัตรแก้ว, ธีรยุทธ วิวัฒนา และไพโรจน์ เทพเจริญนิรันดร์ 2540. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด, กำลังดึง และกำลังดัด ของคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียด. ปริญญานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

ชัย จาตุรพิทั้กษ์กุล, สุรเชษฐ์ จึงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวนากิจ 2543. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย, น.7-19. ในเอกสารการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุใน คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ประจิต จิรัปปภา, 2526. คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ, น. IV 144- 159. ในการประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น

สมชัย กกกำแหง. 2542. การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, น. 65-79. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, นนทบุรี

เอกภพ อังศุวัฒนา, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ทิน เกตุรัตนบวร. 2541.การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง,น. 36-45. ในวารสาร กฟผ. 7, 2(เม.ย.-มิ.ย.)

เอกสิทธ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล. 2542. ผลกระทบของขี้เถ้า ลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลกำลังอัดของคอนกรีต สมรรถนะสูง, น. 90-98. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุในคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

A. J. Zielinski and H. W. Reinhardt. 1982. Impact stress-strain behavior in concrete intension, pp. 345. *In* A. M. Neville.Properties of Concrete. John Wiley & Sons,Inc, New York.

ACI Committee 226. 1987. Use of Fly Ash in Concrete. ACI Materials J. 84 : 381-409

ASTM C 618-94a. 1995. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture In Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02

A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons,Inc, New York.

A. Mokhtarzadeh and C. French. 2000. Mechanical properties of high-strength concrete with consideration for precast applications. ACI Materrials J. 97, (2) : 136-147

D. W. Harris, C. E. Mohorovic, and T. P. Dolen. 2000. Dynamic Properties of Mass Concrete

Obtained from Dam Cores. ACI Materials J. ,Vol. 97, No.3, pp.290-296.

Ferdinand P. Beer. 1992. Mechanics of materials. McGRAW-HILL Inc, Singapore.

G. B. Welch and B. Haisman. 1969. Fracture toughness measurements of concrete, pp.344. *In* A. M. Neville. Properties of concrete. John Wiley & Sons Inc, New York.

H. Green. 1964. Impact strength of concrete, pp. 62-63. In P. Kumar Mehta. Concrete : Structure, properties, and materials. Prentice-Hall Inc, New Jersy.

Helmuth, Richard. 1987. Fly ash in cement and concrete. Portland cement association, Skokie.

J. M. Raphael. 1984. Tensile Strength of Concrete, pp. 596. In A. M. Neville. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Kasai, Y. ET AL. 1983. Air permeability and carbonation of Blended cement mortars, pp. 62. *In* K. Wesche. Fly ash In concrete: Properties and performance. Chapman & Hall, London.

K. Ganesh Babu.1994. Early strength behavior of fly ash concretes. Cement and concrete research 24 (2) : 277-284.

L. Lam, Y.L. Wong, and C.S. Poon. 1998. Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. Cement and concrete research 28 (2) : 271-283 Masatane Kokubu. 1975. Studies on materials for concrete structures. University of Tokyo.

ภาคผนวก

ภาคผนวก (ก)

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	376.90	353.93
	2	20	10	372.20	
	3	20	10	312.70	
28	1	20	10	367.20	321.03
	2	20	10	339.70	
	3	20	10	247.20	

ตารางที่ 2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	267.90	363.53
	2	20	10	197.00	
	3	20	10	249.50	
28	1	20	10	333.10	356.60
	2	20	10	427.80	
	3	20	10	310.90	

ตารางที่ 3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	340.40	327.70
	2	20	10	315.00	
	3	20	10	0	
28	1	20	10	369.70	381.45
	2	20	10	393.20	
	3	20	10	0	

ตารางที่ 4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	199.20	223.60
	2	20	10	0	
	3	20	10	248.00	
28	1	20	10	127.30	165.07
	2	20	10	191.20	
	3	20	10	176.70	

ตารางที่ 5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	286.30	298.90
	2	20	10	311.50	
	3	20	10	193.00	
28	1	20	10	261.70	305.06
	2	20	10	353.80	
	3	20	10	299.70	

ตารางที่ 6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	267.90	258.70
	2	20	10	197.00	
	3	20	10	249.50	
28	1	20	10	290.30	288.90
	2	20	10	323.40	
	3	20	10	253.00	

ตารางที่ 7 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	263.10	221.03
	2	20	10	201.80	
	3	20	10	198.20	
28	1	20	10	341.40	307.13
	2	20	10	240.70	
	3	20	10	339.30	

ตารางที่ 8 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	242.90	248.83
	2	20	10	259.50	
	3	20	10	244.10	
28	1	20	10	213.60	246.07
	2	20	10	244.00	
	3	20	10	280.60	

ตารางที่ 9 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	376.90	353.93
	2	20	10	372.20	
	3	20	10	312.70	
28	1	20	10	367.20	321.03
	2	20	10	339.70	
	3	20	10	247.20	

ตารางที่ 10 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	298.90	308.43
	2	20	10	291.10	
	3	20	10	335.30	
28	1	20	10	382.80	374.87
	2	20	10	353.70	
	3	20	10	346.90	

ตารางที่ 11 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	336.80	341.65
	2	20	10	346.50	
	3	20	10	259.10	
28	1	20	10	391.40	362.23
	2	20	10	292.90	
	3	20	10	346.90	

ตารางที่ 12 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	336.80	341.65
	2	20	10	346.50	
	3	20	10	259.10	
28	1	20	10	216.30	291.77
	2	20	10	292.90	
	3	20	10	366.10	

ตารางที่ 13 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	286.30	298.90
	2	20	10	311.50	
	3	20	10	193.00	
28	1	20	10	261.70	305.06
	2	20	10	353.80	
	3	20	10	299.70	

ตารางที่ 14 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	331.60	320.30
	2	20	10	229.80	
	3	20	10	309.80	
28	1	20	10	213.13	316.70
	2	20	10	296.80	
	3	20	10	336.60	

ตารางที่ 15 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	334,60	329.83
	2	20	10	342.30	
	3	20	10	312.60	
28	1	20	10	289.10	315.37
	2	20	10	351.40	
	3	20	10	305.60	

ตารางที่16 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	283.80	312.40
	2	20	10	293.30	
	3	20	10	360.10	
28	1	20	10	370.20	352.30
	2	20	10	322.90	
	3	20	10	363.80	

ตารางที่ 17 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.13	31.74
	2	40	10	10	34.29	
	3	40	10	10	33.82	
28	1	40	10	10	33.06	32.48
	2	40	10	10	30.34	
	3	40	10	10	34.40	

ตารางที่18 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.54	30.02
	2	40	10	10	30.18	
	3	40	10	10	28.35	
28	1	40	10	10	30.93	31.08
	2	40	10	10	31.64	
	3	40	10	10	30.68	

ตารางที่19 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.15	29.03
	2	40	10	10	28.65	
	3	40	10	10	28.26	
28	1	40	10	10	24.13	27.64
	2	40	10	10	30.02	
	3	40	10	10	28.77	

ตารางที่20 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	20.64	22.26
	2	40	10	10	22.18	
	3	40	10	10	19.02	
28	1	40	10	10	27.33	23.85
	2	40	10	10	23.98	
	3	40	10	10	22.16	

ตารางที่ 21 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	25.92	31.74
	2	40	10	10	27.79	
	3	40	10	10	29.37	
28	1	40	10	10	27.07	27.39
	2	40	10	10	29.31	
	3	40	10	10	25.81	

ตารางที่22 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	23.90	26.11
	2	40	10	10	28.31	
	3	40	10	10	26.13	
28	1	40	10	10	27.48	28.56
	2	40	10	10	28.79	
	3	40	10	10	29.43	

ตารางที่23 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	28.60	29.40
	2	40	10	10	29.63	
	3	40	10	10	30.02	
28	1	40	10	10	29.12	27.22
	2	40	10	10	26.06	
	3	40	10	10	26.49	

ตารางที่24 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	20.28	19.24
	2	40	10	10	22.07	
	3	40	10	10	18.25	
28	1	40	10	10	21.81	23.32
	2	40	10	10	25.52	
	3	40	10	10	22.64	

ตารางที่ 25 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.13	31.74
	2	40	10	10	34.29	
	3	40	10	10	33.82	
28	1	40	10	10	33.06	32.48
	2	40	10	10	30.34	
	3	40	10	10	34.40	

ตารางที่26 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.93	34.62
	2	40	10	10	36.00	
	3	40	10	10	35.93	
28	1	40	10	10	39.32	40.99
	2	40	10	10	42.81	
	3	40	10	10	40.85	

ตารางที่ 27 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.59	31.44
	2	40	10	10	28.65	
	3	40	10	10	34.10	
28	1	40	10	10	36.19	37.23
	2	40	10	10	35.73	
	3	40	10	10	39.79	

ตารางที่ 28 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	23.39	24.47
	2	40	10	10	26.51	
	3	40	10	10	23.52	
28	1	40	10	10	23.27	24.70
	2	40	10	10	28.21	
	3	40	10	10	22.63	

ตารางที่ 29 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	25.92	27.69
	2	40	10	10	27.79	
	3	40	10	10	29.37	
28	1	40	10	10	27.07	27.39
	2	40	10	10	29.31	
	3	40	10	10	25.81	

ตารางที่ 30 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.07	28.40
	2	40	10	10	28.60	
	3	40	10	10	29.54	
28	1	40	10	10	39.25	41.55
	2	40	10	10	43.48	
	3	40	10	10	41.93	

ตารางที่ 31 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	29.87	30.20
	2	40	10	10	28.66	
	3	40	10	10	32.09	
28	1	40	10	10	30.06	28.78
	2	40	10	10	27.29	
	3	40	10	10	19.20	

ตารางที่ 32 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	28.61	30.07
	2	40	10	10	28.94	
	3	40	10	10	32.66	
28	1	40	10	10	44.36	42.26
	2	40	10	10	41.35	
	3	40	10	10	41.08	

ภาคผนวก (ข)

รูปภาพการทดสอบ

รูปภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

รูปภาพที่ 2 แบบหล่อคอนกรีต

รูปภาพที่ 3 การผสมการตรวจสอบการไหลของมอตาร์ การยุบตัวและการบ่มคอนกรีต

รูปภาพที่ 4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก